

大阪市域地盤の周波数応答特性

宮野道雄・呂 恒儉・北本裕之

Frequency Response of Ground in Osaka City Area

MICHIO MIYANO, LU HENG JIAN and HIROYUKI KITAMOTO

はじめに

地震災害への対策を講ずる場合、都道府県あるいは市区町村レベルのような、ある地域的な広がりを対象とした被害予測が実施されている。被害予測の代表例は東京都防災会議等によるもので、その内容はおよそ以下のようである。

まず、対象地域の地盤分類と地震の想定(規模・震源の位置)から地表最大加速度を推定し、各種構造別建物被害を地震応答計算に基づく振動被害や延焼火災・斜面崩壊・津波・地盤の液化化に伴う被害とあわせて予測する。人的被害予測は、上記構造物被害を原因として発生するものの他、ビル落下物、ブロック塀倒壊などによるものと合わせて実施する。また、都市部では電気・ガス・水道などライフラインの被害予測も重要な項目となっている。

このように、地域地震防災における被害予測は、各種の被害事象を重ね合わせて行うことを基本としている。この中にあって、対象地域の地盤特性を評価することは基礎的事項である。その方法としては、単位地形から表層地盤を分類するものや地盤のボーリング柱状図を用いて、S波の重複反射による応答計算を行って分類するものなどがある。前者はボーリング資料が豊富に得られていない地域を統一的に評価する場合に適するのに対し、後者は地層構造を反映した動的解析が行えるところに利点がある。

大阪市域については、比較的新しい埋立地を除いてほぼ全域にわたって、非常に多くのボーリング柱状図が収集、整理されている¹⁾。そこで、本研究では大阪市域地盤の周波数応答特性をS波の重複反射理論によって明らかにし、同市域における各種震害予測を行う際の基礎的資料を得ることを目的とする。

重複反射理論

地盤を図1に示すような成層とし、鉛直下方から入射するせん断波(S波)の一次元的伝播を仮定した場合、地盤の微小要素における力の釣り合いから運動方程式は次のようになる。

$$\rho_j \frac{\partial^2 x_j}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau}{\partial z_j} \quad (1)$$

ここで、 $\tau = G_j \frac{\partial x_j}{\partial z_j}$ であるから(1)式は $\rho_j \frac{\partial^2 x_j}{\partial t^2} = G_j \frac{\partial^2 x_j}{\partial z_j^2}$ となり、さらに $G_j = G_j + i G'_j = G_j (1 + i/Q_j)$ 、 $Q_j^{-1} = G'_j/G_j$ 、 $i = \sqrt{-1}$ の関係を用いて変形すると、下記の基礎方程式が得られる。

$$\rho_j \frac{\partial^2 x_j}{\partial t^2} = (G_j + i G'_j) \frac{\partial^2 x_j}{\partial z_j^2} \quad (2)$$

(1)、(2)式において、 j : 地表から j 番目の地層、 z_j : 第 j 層の上面から下方への深さ(下方へ正)、 x_j : 深さ z_j における水平変位、 t : 時間、 G_j : 第 j 層のせん断剛性率、 ρ_j : 第 j 層の密度、 V_{sj} : 第 j 層のS波速度 $V_{sj} = \sqrt{G_j/\rho_j}$ 、 Q_j : 第 j 層の減衰を表わす Q 値である。

したがって、地表面における応答は(2)式を解いて、せん断力、変位に関する境界条件より、基盤入射波に対する地表面での周波数伝達関数を求めることにより得られる。

S波速度推定式

前述した波動の重複反射理論により地盤の周波数応答計算を行う場合、各地層毎にせん断波速度(S波速度)を決定する必要がある。S波速度は各種の弾性波探査により実測値が得られるが、全国どこでも行われている訳ではなく、かつ本研究で目的とするように、ある地域的な広がりを対象として応答計算を実施する場合には、実測値のみでは対応できない。

そこで、S波速度(V_s)と相関性が高く、資料の得や

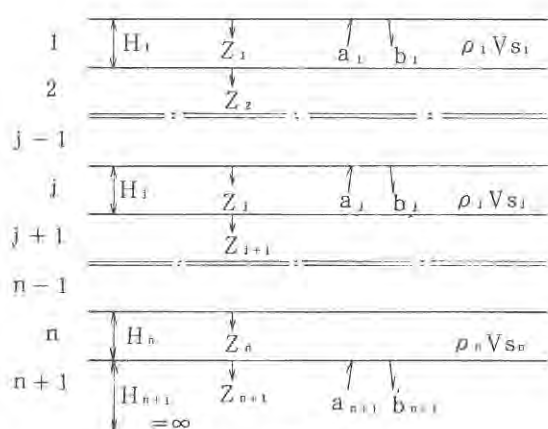


図1 成層地盤モデル

すいN値を変数として V_s を推定する関数式や、それに地層の存在深さおよび地質、形成年代を変数に加えて、 V_s 推定式を改良する試みがなされてきた²⁾。

筆者のうちの1人他も、 V_s をN値と深さDを変数とする $V_s = a + b \times N + c \times D$ や $V_s = a \times N^b \times D^c$ の関数形で推定する方法について検討を加えた^{3), 4)}。ただし、両式とも主として資料数による制約から適用地域を東京都区内または首都圏および首都圏・北海道を除く地域とに区分して求めている。したがって、本研究で既往の推定式を使用する際には、文献4)に示された首都圏・北海道を除く地域を対象として得られた V_s 推定式を用いることになる。しかしながら、大阪市域における弾性波探査資料の蓄積が進んでいるため、今回新たに大阪市内の資料のみを用いて V_s 推定式作成を行うことにする。

大阪市およびその周辺のS波速度実測値を用いて、地盤の形成年代、土質(岩質)別の V_s 推定式を算出した既往の研究としては文献5)があるが、本研究では応答

計算への適用上、盛土を加えるなど土質区分を若干変えて求めることにする。

本研究で使用したS波速度実測資料は、関西地盤の動土質特性調査⁶⁾によりデータベース化されたもの⁷⁾と筆者所有の資料との中から、大阪市内で得られたもののみを選定した合計38地点のデータである。 V_s 推定式の関数形は文献3), 4)での検討結果をふまえて、 $V_s = a \times N^b \times D^c$ を採用する。なお、式中 V_s はS波速度(m/sec)、NはN値、Dは各地層の中間深さ(m)を示す。また、推定式は形成年代および土質別に作成することとし、38地点のボーリング柱状図と弾性波探査結果とから、それぞれ土質・N値・深さとS波速度を読みとったデータを用いて、重回帰分析により定数a, b, cの値を算出した(表1)。

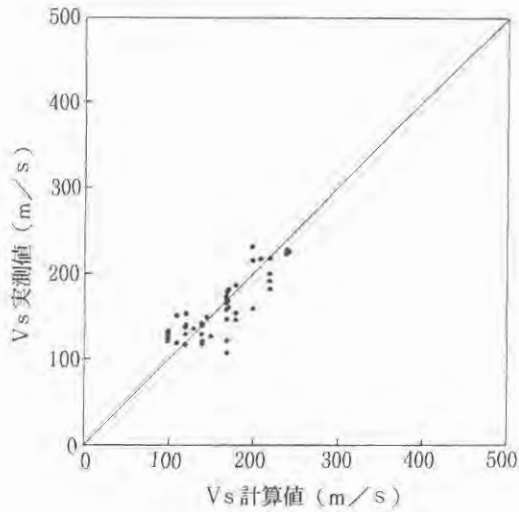
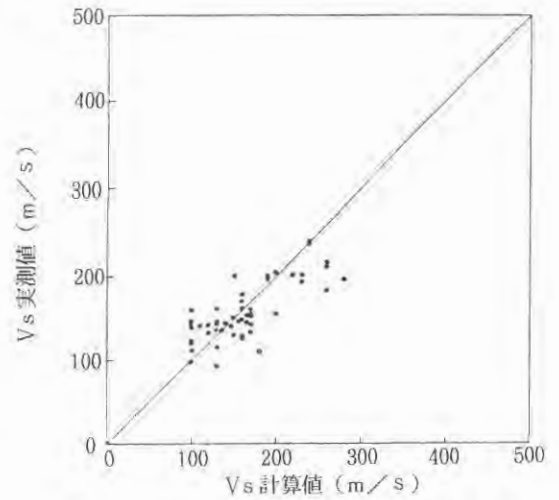
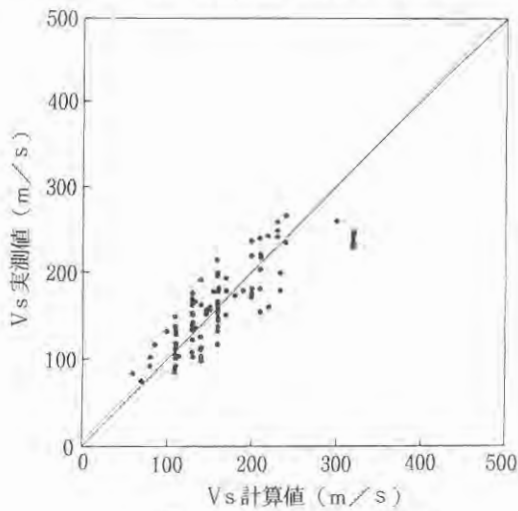
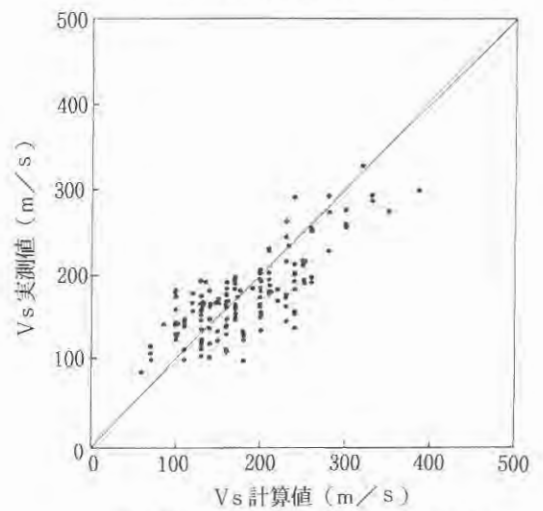
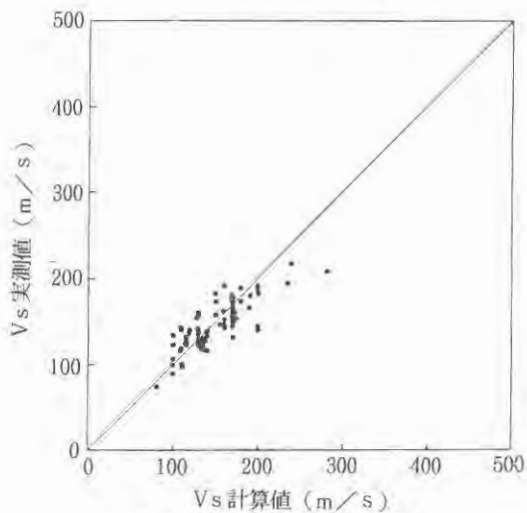
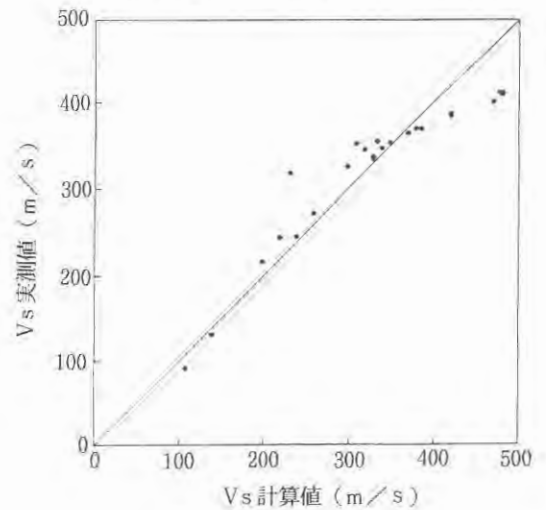
なお、表1には後述する周波数応答計算の実施に当って用いる単位体積重量 γ (t/m³) (密度 $\rho = \gamma / g$ 、ここにgは重力加速度)も土質毎に仮定して併記してあるが、採用値の決定においては文献8)を参考にした。表1において、各土質毎の重相関係数は全体的に良い値を示しており、実用に耐えうると判断した。今回求めた V_s 推定式による計算値と定数算定に用いた実測値との対応を視覚的に確認するために示したものが、図2(1)~(11)である。

大阪市域地盤の周波数応答計算

前述したS波の重複反射理論に基づき、大阪市域地盤の周波数応答計算を実施するに当たっては、大阪市全域を1km×1kmのメッシュで覆い、各メッシュの地盤を代表する柱状図により地盤構成をモデル化して行うことにする。柱状図は文献1)を用いて選定し、253本を抽出した。応答計算用の地盤モデルは、原則的に抽出した253本の

表1 S波速度推定式の諸定数および単位体積重量

年代	土 質	a	b	c	重相関係数	データ数	単位体積重量
沖 積 層	盛 土	90.24	0.249	0.041	0.84	46	1.60
	粘 土	64.76	0.354	0.186	0.76	101	1.60
	シル ト	71.50	0.163	0.216	0.77	77	1.60
	シルト質砂・粘土質砂	81.43	0.117	0.203	0.70	51	1.65
	砂・レキ質砂	87.70	0.142	0.179	0.76	148	1.75
	レ キ	79.46	0.343	-0.031	0.81	24	2.00
洪 積 層	粘 土	125.72	0.336	-0.034	0.76	150	1.70
	シル ト	114.89	0.370	-0.021	0.81	62	1.70
	シルト質砂・粘土質砂	134.49	0.108	0.175	0.72	64	1.75
	砂・レキ質砂	77.89	0.257	0.133	0.76	173	1.85
	レ キ	124.36	0.273	-0.004	0.83	37	2.00

(1) 沖積層 盛土 ($R=0.84$)(4) 沖積層 シルト質砂・粘土質砂 ($R=0.70$)(2) 沖積層 粘土 ($R=0.76$)(5) 沖積層 砂・レキ質砂 ($R=0.76$)(3) 沖積層 シルト ($R=0.77$)(6) 沖積層 レキ ($R=0.81$)

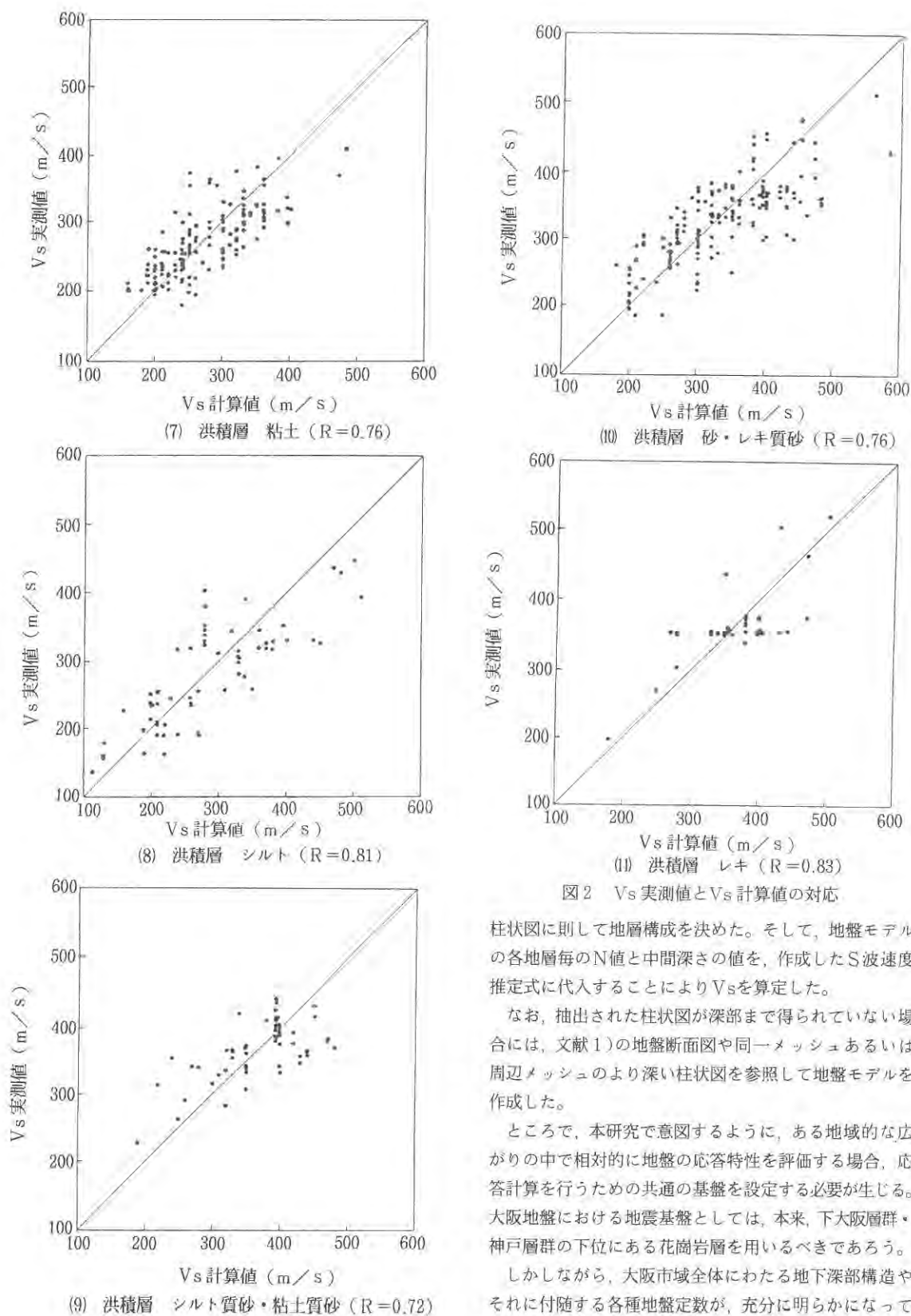


図2 Vs実測値とVs計算値の対応

柱状図に則して地層構成を決めた。そして、地盤モデルの各地層毎のN値と中間深さの値を、作成したS波速度推定式に代入することによりVsを算定した。

なお、抽出された柱状図が深部まで得られていない場合には、文献1)の地盤断面図や同一メッシュあるいは周辺メッシュのより深い柱状図を参照して地盤モデルを作成した。

ところで、本研究で意図するように、ある地域的な広がりの中で相対的に地盤の応答特性を評価する場合、応答計算を行うための共通の基盤を設定する必要が生じる。大阪地盤における地震基盤としては、本来、下大阪層群・神戸層群の下位にある花崗岩層を用いるべきであろう。

しかしながら、大阪市域全体にわたる地下深部構造やそれに付随する各種地盤定数が、十分に明らかになって

いない現在、現実的にはより浅部に基盤面を求める必要がある。文献8)によれば、比較的浅部の地層間でインピーダンス比の大きい箇所は、沖積層と洪積層との境界にみられる。固有周期1秒以下の通常の構造物のみを対象として考察を行う場合には、沖積層基底面を基盤面と考えても良いであろう。しかし、本研究では洪積層面が露出する上町台地地区も含めて検討を行うため、沖積層基底面より下位に基盤面を求める必要がある。

そこで、今回はインピーダンス比が比較的大きい上部洪積層と大阪層群との境界面、すなわち大阪層群M₁₀層上面を基盤面に設定することにした。ただし、現時点でM₁₀層上面の等深度分布を大阪市域全体にわたって与える資料がないため、文献1)の付図および文献9)に示された地質断面を用いて、図3に表わすような基盤深さ分布(単位はmでO.P.による)を推定した。

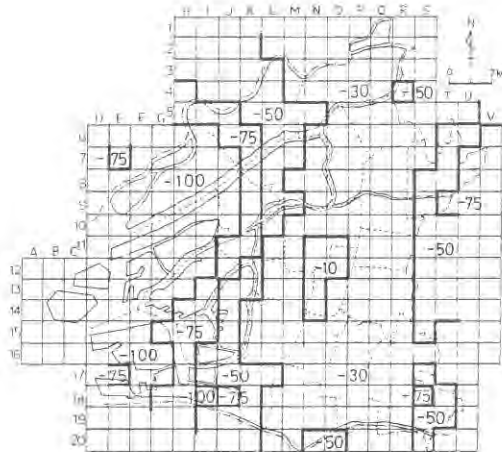


図3 基盤深さ(O.P.) (単位:m)

以上のように設定した基盤は、低層および中高層の建物を対象とした地震被害を検討する際には、大きな不都合を生じないと考える。なお、応答計算の実施に当って、前述したQ値は各地質とも共通で20の一定値を用いている。また、基盤のV_sは500m/sec、単位体積重量は2.0 t/m³としている。

このようにして得られた設定条件の下で、大阪市域地盤の周波数応答計算を実施した。計算は0.1Hzから15.0 Hzまで0.1Hz刻みで、基盤入力に対する地表面における応答倍率を求めた。その結果の一例(メッシュ番号8-M)を示すと図4のようである。さらに、抽出された253本の柱状図に基づき得られた253種類の地盤モデルについて求められた計算結果から、応答倍率の最大ピーク

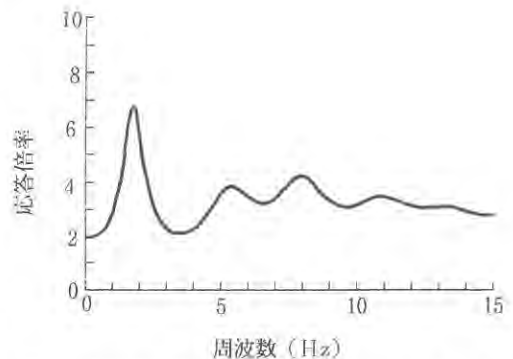


図4 周波数応答計算結果の例(メッシュ番号8-M)
値とそれに対応する周波数の値とを区分し、それぞれの分布をメッシュ図で示したものが図5、図6である。ただし、両図には適当な柱状図が得られず周囲の計算結果から推定した12メッシュも含まれている。

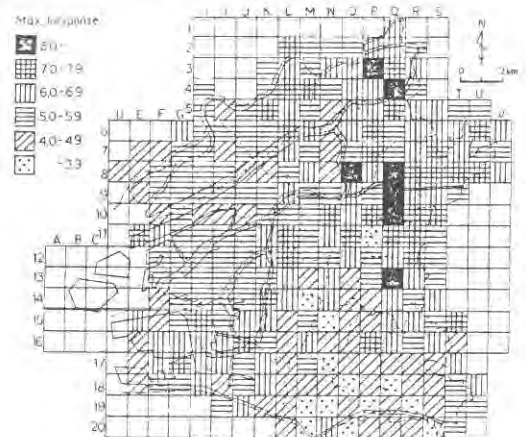


図5 応答倍率の最大ピーク値分布

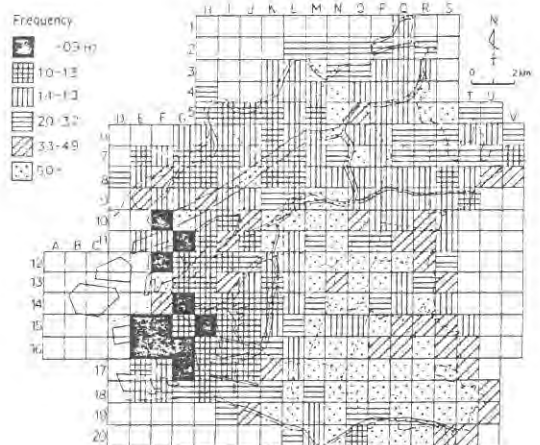


図6 最大ピーク値に対応する周波数分布

図5の最大ピーク値分布によれば、市北東部に7.0倍を越える相対的に高い地区がややまとまって存在する。それに対し、南東部は4.0倍以下の小さな値を示している。これら両地区の基盤深さは共にO.P.-30mで、今回の設定基盤の中では比較的浅い部類に属している。したがって、基盤より上の地質の違いにより生じた結果とみることができる。

また、図6に示した対応周波数も市北東部が一般に2.0Hz前後以下であるのに対し、南東部では5.0Hz以上が広く分布しており対照的である。さらに、市中央付近の上町台地に相当する地区では、応答倍率はやや高くなっているが、対応周波数はほぼ5.0Hz以上である。一方、市西部の湾岸地区は全体的にさほど応答倍率は大きくないが、対応周波数としては1.0Hz前後以下の低周波数すなわち長周期の地区が広く分布し、基盤までの深さが大きいことを反映した結果となっている。

ま と め

本研究は、大阪市を対象とした地域地震防災を考える場合、基礎的事項として必須である大阪市域地盤の応答特性を、S波の重複反射理論に基づく周波数応答計算結果により評価したものである。応答計算により得られた最大ピーク値および最大ピークを生ずる周波数に基づき、地盤の応答特性を検討した結果、大阪市域は北東部、南東部、西半分の湾岸部の3地域と中央部の上町台地地区とに分類することができた。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、大阪市立大学理学部中川康一博士には基盤設定およびS波速度資料についてご教示を

賜った。また、(財)関西情報センター直田春夫氏にはS波速度等の地盤資料収集で多大なご便宜を頂戴した。ここに記して深謝する次第である。応答計算実施に当っては、大阪市立大学住居学科4回生本山治子氏、延原理恵氏の協力をいただいた。合わせて感謝申し上げる。

文 献

- 1) 土質工学会関西支部・関西地質調査業協会：新編大阪地盤図，コロナ社（1987）
- 2) 日本建築学会：地震動と地盤，P.125（1983）
- 3) 宮野道雄・望月利男・田治米辰雄：東京都区内地盤のS波速度とその増幅特性について（その1．地盤のS波速度），日本建築学会関東支部研究報告集，P.109～112（1976）
- 4) 田治米辰雄・望月利男・宮野道雄・荏本孝久・沼尻靖久：地盤との連成効果を考慮したRC造建物の震害に関する解析的研究（その1．地盤のS波速度の推定式），日本建築学会大会学術講演梗概集，P.731～732（1982）
- 5) 三田村宗樹・中川康一・林田精郎：大阪地盤のS波速度と土性，第24回土質工学研究発表会，P.697～698（1989）
- 6) 土質工学会関西支部・「関西地盤の動土質特性調査」委員会：関西地盤の動土質特性調査業務報告書（1982）
- 7) 関西情報センター：P.S検層地盤資料
- 8) 土質工学会：大阪地盤，P.239，P.247（1977）
- 9) Editorial Committee for Technical Report on Osaka Land Subsidence：Report on Land Subsidence in Osaka，P.77（1969）

（平成2年10月11日受理）

Summary

This paper estimates the characteristics of ground response in Osaka City area due to the frequency response analysis.

The flow of this study is shown as below.

- 1) To make functions to calculate S wave velocity of each soil. (Table 1)
- 2) Seismic basis is determined as the upper boundary of the Ma 10 in the Osaka group. (Fig. 3)
- 3) To make the models of surface layer ground by using boring logs.
- 4) Carrying out the frequency response analysis. (Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6)

As a result of this study, it was clarified that Osaka City area was classified four parts (northeast, southeast, west part of the City and central Uemachi upland area) by means of the value and the period of the maximum response magnification factor.